

**SIMULACIÓN AVANZADA DEL  
DESEMPEÑO DE VEHÍCULOS  
AUTOMOTORES HÍBRIDOS  
UTILIZANDO BIOCOMBUSTIBLES**

**ADVANCED SIMULATION OF  
HYBRID MOTOR VEHICLE  
PERFORMANCE USING BIOFUELS**

**SIMULAÇÃO AVANÇADA DO  
DESEMPENHO DO VEÍCULO  
MOTORES HÍBRIDOS USANDO  
BIOCOMBUSTÍVEIS**

**Renato Augusto Romero Merino**

Instituto Politécnico Nacional, Centro Mexicano para la Producción más Limpia, Maestría en ingeniería de producción más limpia, rromerom1900@alumno.ipn.mx

**Juan Carlos Paredes Rojas**

Instituto Politécnico Nacional, Centro Mexicano para la Producción más Limpia, Profesor investigador, paredesrojasjc@gmail.com

**Jessica Meza Quintana**

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica unidad Culhuacán, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación jessca1101@gmail.com

**Ignacio Carvajal Mariscal**

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica unidad Zacatenco, Departamento de Posgrado en Ingeniería Mecánica, icarvajal@ipn.mx

**Brenda Bravo Díaz**

Instituto Politécnico Nacional, Centro Mexicano para la Producción más Limpia, Profesor investigador. bbravod@ion.mx

**Fecha de Recepción:** 03 de diciembre de 2019

**Fecha aprobación:** 23 de marzo de 2020

## Resumen

En el presente trabajo se evaluaron las emisiones generadas por el funcionamiento de dos vehículos automotores por medio del Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR®), un simulador avanzado para vehículos utilizando como base de ejecución a MATLAB, estos vehículos siguieron la ruta de la línea 1 del Sistema de Corredores de Transporte Público de Pasajeros de la Ciudad de México mejor conocido como Metrobús, Indios Verdes – Dr. Gálvez. Los vehículos fueron: el modelo Volvo® 7700 híbrido que es utilizado por Metrobús y el Toyota® Prius 2004, siendo elegidos estos modelos por ser representativos híbridos de transporte de pasajeros en el parque vehicular de la Ciudad de México. Por la naturaleza de los motores se eligió como combustible el biodiésel en el caso del modelo Volvo® y bioetanol en el caso del modelo de Toyota®.

El trabajo permitió evaluar la generación de emisiones contaminantes utilizando estos biocombustibles, así como el desempeño de los vehículos para proponer una solución a los problemas de contaminación ambiental de la Ciudad de México.

**Palabras clave—** Vehículos híbridos, Biodiésel, Bioetanol, Transporte público, Simulación avanzada.

## Abstract

This work evaluated the emissions generated by the operation of two motor vehicles through the Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR®), an

advanced simulator for vehicles using MATLAB as a base of execution, these vehicles followed the route of line 1 of the Mexican City Public Passenger Transport Corridor System better known as Metrobus, Indians Verdes – Dr. Gálvez. The vehicles were: the Volvo® 7700 hybrid model that is used by Metrobús and the Toyota® Prius 2004, being chosen these models for being representative hybrid passenger transport in the vehicle park of Mexico City. By the nature of the engines, biodiesel was chosen as fuel in the case of the Volvo® and bioethanol model in the case of the Toyota® model.

The work made it possible to evaluate the generation of polluting emissions using these biofuels, as well as the performance of vehicles to propose a solution to Mexico City's environmental pollution problems.

**Keywords—** Hybrid vehicles, Biodiesel, Bioethanol, Public Transportation, Advanced Simulation

## Resumo

No presente trabalho as emissões geradas pela operação de dois veículos motorizados foram avaliadas por meio do Simulador Avançado de Veículos (ADVISOR®), um simulador avançado de veículos que utiliza o MATLAB como base de execução. Estes veículos seguiram a rota da linha 1 do Sistema de Corredor de Transporte Público da Cidade do México mais conhecido como Metrô, Índios Verdes - Dr. Gálvez. Os veículos foram: o modelo híbrido Volvo® 7700 que é utilizado pela metrô e o Toyota® Prius 2004, sendo escolhidos por serem modelos híbridos representativos do transporte de

passageiros da frota de veículos da Cidade do México. Debido à natureza dos motores, o biodiesel foi escolhido como combustível no caso do modelo Volvo® e o bioetanol no caso do modelo Toyota®.

O trabalho possibilitou avaliar a geração de emissões poluentes utilizando esses biocombustíveis, bem como o desempenho dos veículos para propor uma solução para os problemas de poluição ambiental da Cidade do México.

**Palavras-chave:** Veículos híbridos, Biodiesel, Bioetanol, Transporte Público, Simulação Avançada.

## Introducción

El crecimiento acelerado que ha tenido la sociedad en su búsqueda por el desarrollo, desde la revolución industrial, ha provocado la ruptura del equilibrio natural del planeta, modificando sus condiciones óptimas para la sostenibilidad de la vida.

Dentro de las actividades antropogénicas, el sector transporte es uno de los que mayor impacto ambiental tiene y su crecimiento se ha ido elevando en los últimos años.

A pesar de los esfuerzos que se han tenido tanto tecnológica como políticamente para la reducción de emisiones contaminantes, tales como la creación de vehículos más limpios o programas de circulación, éstos han sido insuficientes para lograrlo, por el contrario, los niveles de toxicidad, así como las consecuencias de éstos, han aumentado, lo que se refleja en la creciente tasa de

mortalidad. Esto se puede observar en la pérdida de biodiversidad, así como de la productividad por parte de la sociedad, lo que se traduce en grandes inversiones en el sector salud y de protección ambiental para poder atender esta situación que sigue agravándose.

Este fenómeno es imposible de ignorar, por lo que se deben implementar estrategias para una solución inmediata.

La fuente de energía más utilizada en el transporte son los combustibles fósiles. El uso de los mismos se debe a la oferta que se tiene, sus beneficios termodinámicos, además de su relativo bajo costo. No obstante, el impacto que provocan es alto, así como de ser recursos no renovables. Como alternativa, se han propuesto los biocombustibles, que encima de ser una fuente energética renovable, sus características son muy similares a las de los combustibles fósiles y su desarrollo ha permitido ampliar la matriz energética en búsqueda de fuentes más limpias.

La generación de nuevas tecnologías sumado con una buena gestión de las mismas pretende dar cambios positivos al desarrollo económico sin comprometer al medio ambiente. Ejemplo de esto, es la generación e implementación de tecnologías más limpias, así como programas de concientización a la sociedad con miras a un desarrollo sostenible.

Los intentos para responder al deterioro del planeta deben persistir para estructurar estrategias sólidas y permanentes, aprovechando los recursos científicos y tecnológicos disponibles, además de no detenerse en la búsqueda de ampliarlos a favor del medio ambiente y el desarrollo.

En el presente trabajo se complementó la

tecnología limpia existente para el transporte de pasajeros por vía terrestre en la Ciudad de México con el uso de biocombustibles aprovechando el principio de funcionamiento de los vehículos híbridos con las características del biodiésel y bioetanol en busca de la reducción de emisiones contaminantes sin comprometer el desempeño de los vehículos.

### Contaminación del aire en la Ciudad de México

La Ciudad de México es una región que naturalmente tiene una desventaja para contrarrestar el crecimiento urbano. Con velocidades del viento muy bajas, sin ríos cercanos (causado por el desagüe del lago de Texcoco y cercanos), un área de alto riesgo sísmico y un suelo con características fangosas debido a que está asentada en lo que milenariamente fue un lago. Esta ciudad sufre de problemas ambientales muy serios que con el crecimiento poblacional y la mancha urbana han sido acrecentados. Uno de los problemas que incrementan la contaminación del aire es la escasez de áreas verdes en la ciudad. A continuación, la Tabla 1 muestra el porcentaje de áreas verdes en la Ciudad de México hasta el año 2009, este fue el último estudio que determinó la superficie que ocupan éstas en la ciudad:

**Tabla 1. Porcentaje de áreas verdes en la Ciudad de México**

Tipo de zona verde	Superficie ocupada (Km <sup>2</sup> )	Porcentaje de la superficie de la Ciudad de México
Arbolado	78.1	12.8%
Pastos y arbustos	34.8	5.7%
<b>Total</b>	<b>112.9</b>	<b>18.5%</b>

Fuente: Las áreas verdes en la Ciudad de México. Las diversas escalas de una geografía urbana (Checa Artasu, 2016)

La contaminación ambiental en México tuvo indicios evidentes durante la década de los setentas. Durante la década de los ochenta, la atención del gobierno a la crisis ambiental fue creciente y diversa desde el punto de vista de las medidas que se llevaron a cabo (Micheli, 2000).

En caso particular la evaluación del impacto ambiental en México ha tenido una evolución desde la década de los setenta, en preparación para la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente Humano de Estocolmo 1972, estableció en el año de 1971 la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental y, a partir de este momento, comienzan los esfuerzos institucionales en el país para desarrollar metodologías y mecanismos tendientes a evaluar el impacto ambiental de las diversas actividades productivas.

Actualmente la calidad del aire en la Ciudad de México es monitoreada diariamente debido a la variación en la calidad del aire, lo cual es de suma importancia para la vida diaria de la población del lugar.

La implementación del protocolo de Kyoto en México se llevó a cabo hasta 1997, gracias a éste, se establecieron los porcentajes de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, pues exige una reducción de al menos un 5.25% en las emisiones contaminantes de CO<sub>2</sub>, solicitud que el gobierno Federal se comprometió a cumplir.

Con los años, el gobierno intentó implementar programas destinados a reducir los niveles de contaminación. El más conocido fue el programa "Un día sin auto" introducido en 1989 que actualmente se conoce como "Hoy no circula", según el cual los automóviles que no

cumplen los criterios de emisión no pueden circular en un día determinado de la semana, dependiendo del último número de la placa de sus vehículos, de lo que depende también el color del engomado de éstos. Al analizar el impacto de este programa con un diseño de discontinuidad de regresión, se mostró que esta política no es efectiva (Germá Bel, 2018).

Un dato que empieza a causar alerta es cuando en el año 2011 México se ubica en el lugar número 13 entre los primeros 15 países generadores de Gases Efecto Invernadero (GEI) y es responsable del 2% de total arrojado a la atmósfera, por lo que es uno de los principales responsables del cambio climático global (Ramos, 2016).

Considerando el ritmo de crecimiento desmedido de la Ciudad de México, los efectos de factores antrópicos generadores de contaminación en dicho territorio han impactado considerablemente las condiciones en que se encuentra el ecosistema a su alrededor.

### Automóviles Híbridos

El transporte es una actividad fundamental para la humanidad, por lo que el desarrollo tecnológico para hacerlo más eficiente ha sido constante. En el caso del transporte terrestre, se han tenido innovaciones en tecnologías más limpias como es el caso de los vehículos híbridos.

Un vehículo eléctrico híbrido es aquel que contiene un motor eléctrico en el cual, la energía que está contenida en baterías alimenta a este. Alternativamente al motor eléctrico, el vehículo híbrido contiene un motor de combustión interna, que, dependiendo de su configuración, puede mover un generador, así

como también darle movimiento directamente a las ruedas.

En un vehículo híbrido, el motor de combustión interna es la segunda opción, dando prioridad al motor eléctrico, haciendo la determinación de sus usos por medio de un control electrónico. A diferencia de los vehículos eléctricos que utilizan solo una fuente de movimiento (motor eléctrico) lo que representa una autonomía limitada debido a la capacidad de carga que ofrecen sus baterías, las cuales a su vez representan una carga en peso extra, los vehículos híbridos fueron creados con el objetivo principal de extender el rango de manejo agregando un sistema de motor alternativo para cargar las baterías a bordo.

### A. Componentes de un automóvil híbrido

#### Los componentes de un automóvil híbrido son:

- 1) **Motor a gasolina:** En los motores híbridos, los motores de combustión interna son los generadores principales de energía.
- 2) **Baterías:** Estas son utilizadas para alimentar al motor eléctrico. En comparación con la fuente de energía del motor de combustión interna que es el tanque de combustible, la energía puede retornar a la fuente, en este caso las baterías, ya sea por medio de frenos regenerativos o de la tracción misma.
- 3) **Motor eléctrico:** Existen varias configuraciones de motores en trenes motrices híbridos: de un solo motor, dos (uno en cada rueda de un eje), o cuatro (uno en cada rueda) (Martínez, 2016). Se pueden utilizar dos tipos de motores: de corriente alterna o de corriente continua.

a) **Motores de corriente continua:** Los motores de corriente continua son más fáciles de controlar debido a que solo se debe controlar la amplitud. Sus tipos son: motores de imanes permanentes, motores en serie y los motores de excitación independiente. Los motores de este tipo ofrecen grandes pares de arranque, así como que la alimentación y la regulación de su velocidad es sencilla (Martínez, 2016).

b) **Motores de corriente alterna:** Los motores de corriente alterna son más difíciles de controlar que los motores de corriente continua porque se debe de controlar la frecuencia de la tensión de alimentación, así como la amplitud de la tensión. Los tipos de motores de corriente alterna son: motores asíncronos, asíncronos de anillos rozantes, jaula de ardilla y los motores síncronos.

4) **Generador:** Es el encargado de producir energía eléctrica. Es utilizado por lo general en vehículos híbridos con configuración en serie. Los hay de dos tipos: generador de corriente continua y generador de corriente alterna.

5) **Convertidor:** Este dispositivo es una pequeña batería que alimenta a los accesorios (limpiaparabrisas, luces, claxon, etc.) con un convertidor de transistores electrónico.

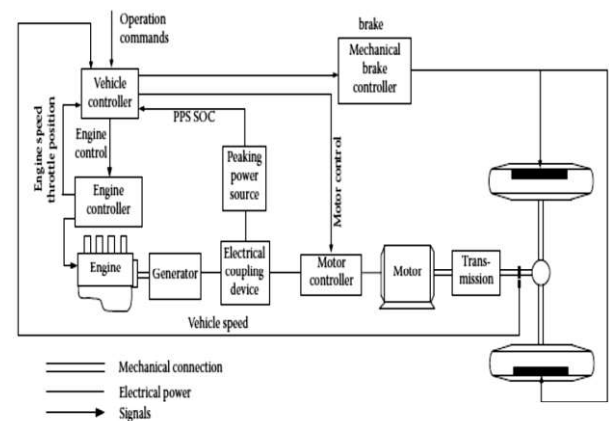
6) **Cargador:** Transforma la corriente alterna de 220 voltios de las tomas de corriente continua a la tensión determinada. Hacen falta dos convertidores, uno para convertir la electricidad alterna proveniente del alternador en corriente continua que pueda cargar la batería y otro

que adapte la salida de las baterías al motor eléctrico (Martínez, 2016).

7) **Variador:** Este componente es el encargado de suministrar energía eléctrica al motor eléctrico dependiendo de la posición del acelerador.

8) **Transmisión:** Básicamente cumplen la misma función que en un automóvil convencional, la cual es transmitir la energía mecánica del motor a las ruedas para generar movimiento.

Fig. 1. Diagrama de un automóvil híbrido en serie



Fuente: Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles (Ehsani, Gao, & Longo, 2018)

El freno regenerativo reduce la energía cinética del automóvil para convertirla en eléctrica, la cual será almacenada en las baterías para su uso posterior.

## B. Tipos de automóviles híbridos

Existen tres tipos de trenes de propulsión o híbridos: en serie, en paralelo y en serie-paralelo o combinado.

## 1) Automóviles híbridos en serie

En los trenes motrices híbridos en serie, el motor eléctrico es el único que está conectado a la transmisión, por lo tanto, es el encargado de dar la tracción, mientras que el motor térmico es aquel que genera electricidad para alimentar las baterías del sistema.

Los automóviles híbridos en serie fueron creados para ser propulsados por un motor de tracción, este motor es alimentado por un paquete de baterías y/o una unidad de motor/generador. La energía de ambas fuentes de poder es combinada por medio de un dispositivo de acoplamiento eléctrico controlable basado en la electrónica de potencia. Los modos de operación son variados y estos entran en servicio de acuerdo con las demandas de potencia del conductor y del estado operativo del sistema de transmisión (Ehsani, Gao, & Longo, 2018). En la figura 1 se muestra la configuración típica de un tren motriz híbrido en serie:

## 2) Automóviles híbridos en paralelo

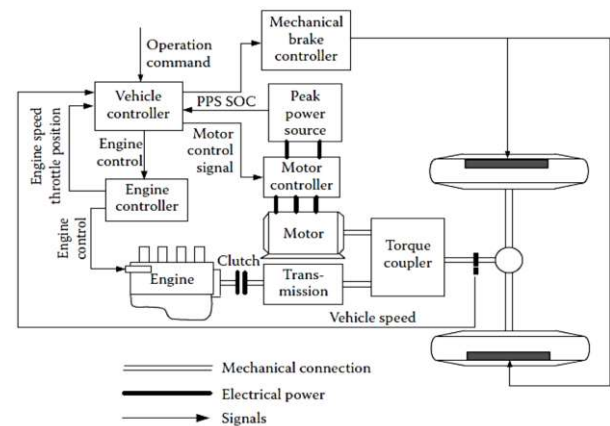
En esta configuración, a diferencia del tren motriz en serie, el motor térmico y el eléctrico pueden impulsar al vehículo ya que están conectados ambos a la transmisión, lo que permite transmitir su energía mecánica individualmente o en conjunto. Existen dos tipos de acoplamiento mecánico: el acoplamiento de torque y el de velocidad. Las ventajas que se tienen en la configuración en paralelo son las siguientes:

- No se necesita un generador.
- Un motor de tracción más pequeño.

- Sólo una parte de la potencia del motor pasa por conversión multi-poder

Gracias a esto se puede decir que la eficiencia en los trenes motrices híbridos en paralelo es mayor que en los configurados en serie. A continuación, en la figura 2 se observa la configuración de un tren motriz híbrido en paralelo:

**Fig. 2. Diagrama de un automóvil híbrido en paralelo**



Fuente: Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles (Ehsani, Gao, & Longo, 2018)

## 2) Automóviles híbridos en serie – paralelo

Esta configuración complementa a las anteriores porque el motor eléctrico funciona en solitario a bajas velocidades, mientras que el térmico funciona en conjunto con el eléctrico a altas velocidades. La única diferencia de esta configuración con las anteriores es que dispone de otro generador independiente, el cual genera electricidad para alimentar y así alimentar al motor eléctrico.

## Sistema de corredores de transporte de pasajeros de la ciudad de México (Metrobús)

Para que exista desarrollo en una ciudad, el transporte público es una parte fundamental de este. La población tiene que acceder a educación, servicios públicos y empleo, y en su mayoría, el medio para hacerlo es el transporte público, por lo que es de suma importancia tener un transporte eficiente, económico y accesible.

El sistema de corredores de transporte público de la Ciudad de México, mejor conocido como Metrobús es un sistema de transporte basado en autobuses de tránsito rápido, el cual presta servicio en toda la Ciudad de México por medio de 7 líneas, las cuales tienen asignado un número y color distintivo.

### A. Componentes del sistema

#### 1. Infraestructura

a) *Carril confinado*: El carril permite el libre tránsito a los autobuses articulados y biarticulados, realizando un traslado rápido y más seguro

b) Estaciones: De plataforma elevada, las estaciones permiten ingreso a nivel a los autobuses.

#### 2. Organización

a) Concesionarios de operación: Empresas privadas con la concesión de brindar el servicio de operación de flota.

b) Concesionarios de recaudación: Empresas

privadas con la concesión de brindar el servicio de la recaudación de la tarifa.

c) Organismo Público: Organismo público descentralizado responsable de la administración, planeación y control de sistema.

### 3. Operación

a) Servicio: El servicio es programado y controlado para que sea rápido y frecuente entre origen y destino.

b) Capacidad: Capacidad para atender altas demandas de pasajeros.

c) Seguridad: Ascenso y descenso rápido, seguro y a nivel.

d) Peaje: Sistema de peaje totalmente automatizado por medio de una tarjeta inteligente.

### 4. Tecnología

a) Flota: Autobuses de gran capacidad con alta tecnología y muy bajas emisiones contaminantes.

b) Peaje: Sistema de pago totalmente automatizado por medio de tarjeta inteligente.

#### B. Líneas del Metrobús

Las líneas que conforman a Metrobús son:

1) Línea 1 – Avenida de los insurgentes.

2) Línea 2 – Eje 4 sur.

3) Línea 3 – Eje 1 poniente.

4) Línea 4 – Buenavista – San Lázaro – Aeropuerto Terminales 1 y 2.



- 5) Línea 5 – Eje 3 Oriente – Avenida Ingeniero Eduardo Molina.
- 6) Línea 6 – Eje 5 Norte – Avenida Montevideo.
- 7) Línea 7 – Avenida Paseo de la Reforma.

En la figura 3 se puede observar el mapa del sistema:

**Fig. 3. Mapa del sistema Metrobús**



Fuente: Metrobús, mapa del sistema, <http://www.metrobus.cdmx.gov.mx>

### Materiales y Métodos

Se utilizó el Software Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR ®) que es una marca registrada de la Alianza para la Energía Sostenible, la sociedad de responsabilidad limitada, el gerente y operador del Laboratorio Nacional de Energía Renovable del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Este es un programa de simulación basado en MATLAB/Simulink para el análisis rápido del desempeño y la economía de combustible de vehículos ligeros y de uso pesado con combustible convencional (gasolina/diésel), híbridos, eléctricos y motores de celda de combustible (SourceForge, 2019).

Para llevar a cabo el análisis se eligieron dos vehículos representativos en el parque vehicular de la Ciudad de México los cuales son el Toyota® Prius, automóvil híbrido más vendido en México con más de 10,000 unidades vendidas durante el 2018 (Anderson, 2018) y el Volvo® 7700 híbrido, siendo el único modelo de esta naturaleza en la flota de autobuses del Metrobús. La ruta elegida fue la línea de Metrobús más transitada de todas, la línea 1, con más de 480,0090 usuarios al día.

### 9) Características de un Vehículo Toyota Prius modelo 2004

El modelo que se utilizó para la prueba fue un Toyota® Prius modelo 2004 de segunda generación, ya que la última versión de ADVISOR tiene este modelo en su base de datos. Las características del automóvil se muestran en la tabla 2:

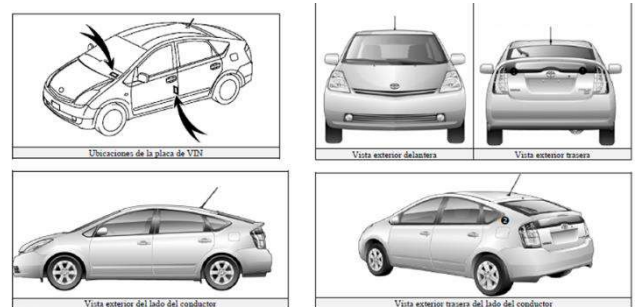
**Tabla 2. Características del Toyota Prius**

Parte	Característica	Descripción
Motor de combustión interna	Combustible	Gasolina
	Potencia Máxima	77 CV / 57 kW
	Revoluciones a máxima potencia	5000 RPM
	Par máximo	115 N *m
	Revoluciones a par máximo	4200 RPM
	Ubicación	Delantero transversal
Motor eléctrico	Número de cilindros	4
	Tipo de corriente	Corriente alterna
	Potencia máxima	68 CV / 50 kW
	Par máximo	400 N * m
Batería	Ubicación	Delantero transversal
	Tensión nominal	500 V
	Tipo	Acumulador de níquel – hidruro metálico
Transmisión	Ubicación	Trasera
	Capacidad	1.31 kWh
	Tracción	Delantero
	Caja de cambios	Automática
Transmisión	Número de velocidades	Múltiples
	Tipo de mando	Selección
	Tipo de embrague	Sin embrague
	Tipo de mecanismo	Epicicloidal

Fuente: Toyota Prius, modelo de 2004 2ª generación (Toyota motors corporation, 2004)

El modelo se puede observar en la figura 4:

**Fig. 4. Toyota Prius de 2ª generación.**



Fuente: Toyota Prius, modelo de 2004 2ª generación (Toyota motors corporation, 2004)

### 10) Características de un Vehículo Volvo 7700 híbrido

Se configuró al simulador con las características de este modelo, el cuál es el híbrido que se encuentra en la flota de Metrobús. Sus características se pueden observar en la tabla 3:

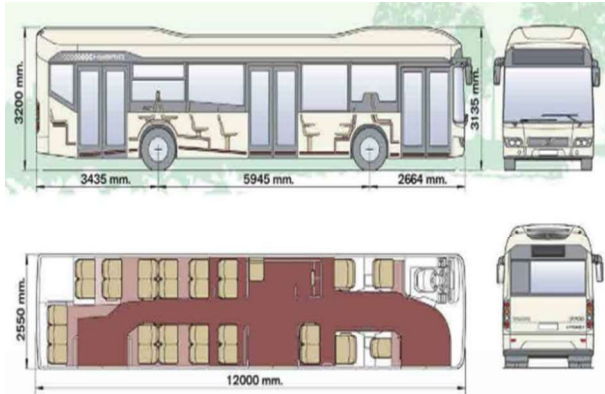
**Tabla 3. Características del Volvo 7700 híbrido**

Parte	Característica	Descripción
Motor de combustión interna	Combustible	Diésel
	Potencia Máxima	215 HP / 160.3 kW
	Número de cilindros	4
Motor eléctrico	Tipo de corriente	Corriente alterna
	Potencia máxima	160 HP / 119.3 kW
	Par máximo	800 N * m
Transmisión	Caja de cambios	Semi-automática
	Número de velocidades	12 velocidades
	Tipo de mando	Módulo automático
	Torque	2400 N * m

Fuente: Volvo 7700 híbrido (Volvo buses, 2015)

El esquema del modelo se puede observar en la figura 5:

**Fig. 5. Volvo 7700 híbrido.**



Fuente: Fuente: Autobuses híbridos, movilidad y ambiente ahora en paralelo (Volvo buses, 2015)

### 11) Ciclo de conducción de la línea 1 del Metrobús

Un ciclo de conducción es una serie de puntos dados de datos, los cuales representan la velocidad que obtiene un vehículo durante un tiempo establecido.

Se solicitaron datos al sistema Metrobús de la línea 1 "Avenida de los insurgentes" la cual tiene distintas rutas programados: Indios verdes – Insurgentes, Indios verdes - El caminero, Indios verdes – Doctor Gálvez, Buenavista II – El caminero, Colonia del Valle – Tepalcates. La ruta seleccionada fue indios verdes – El caminero. Las características de la línea se observan en la tabla 4:

**Tabla 4. Características de la línea 1 del Metrobús**

Característica	Descripción
Longitud de la línea	23.55 kilómetros
Tiempo total de recorrido	1:12:06 horas
Estaciones recorridas	36
Velocidad promedio	20.12 km/h

Fuente: elaboración propia

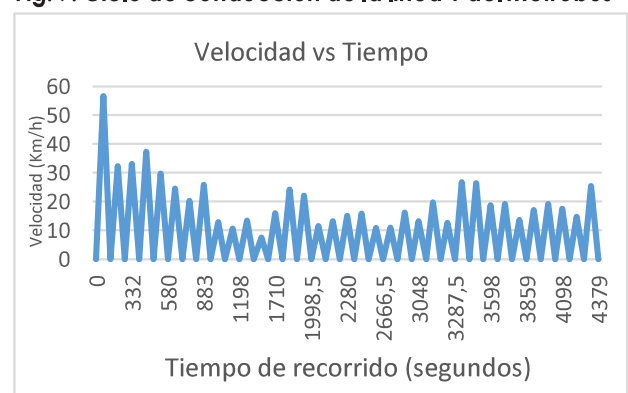
El perfil de elevación de la línea 1, se observa en la figura 6 y el ciclo de conducción final en la figura 7:

**Fig. 6. Perfil de elevación de la línea 1 del Metrobús.**



Fuente: Mapa del sistema Metrobús, (Metrobús, 2019)

**Fig. 7. Ciclo de conducción de la línea 1 del Metrobús**



Fuente: Elaboración propia

## 12) Características de los combustibles

Para el caso de los combustibles fósiles, se tomaron en cuenta las especificaciones para el diésel y gasolina comercializadas en la Ciudad de México, las cuales se pueden observar en la tabla 5:

**Tabla 5. Características de los combustibles fósiles**

Características	Diésel	Gasolina
Poder calorífico	43.932 MJ/Kg	42.6 MJ/Kg
Densidad	0.850 kg/l	0.760 kg/l
Viscosidad	1.9 – 4.1 mm <sup>2</sup> /s	1.9 – 4.1 mm <sup>2</sup> /s
Contenido de azufre	0.05% máximo	0.001%

Fuente: Elaboración propia

Las características utilizadas para poder llevar a cabo la simulación se tomaron de estándares internacionales para el aseguramiento de su calidad en biocombustibles, tales como la norma ASTM D6751 para el caso del biodiésel y la ASTM D4814 para el caso del bioetanol. Estas características se muestran a continuación en la tabla 6:

**Tabla 6. Características de los biocombustibles**

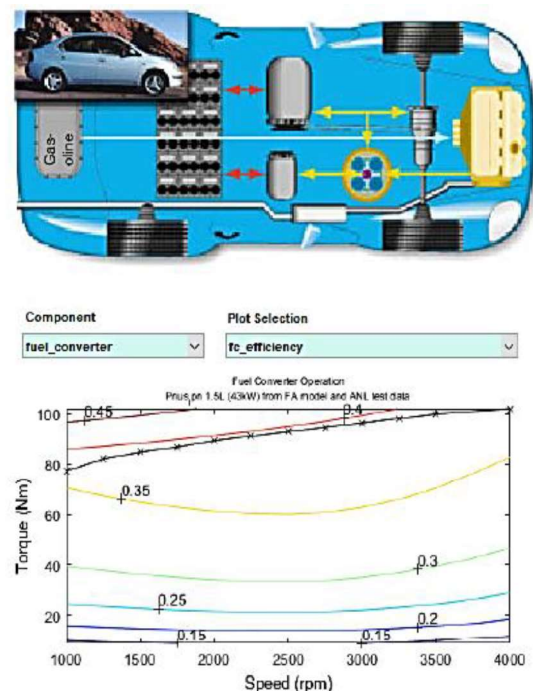
Características	biodiésel	Bioetanol
Poder calorífico	39.748 MJ/Kg	28.0 MJ/Kg
Densidad	0.994 kg/l	0.792 kg/l
Viscosidad	1.9 – 4.1 mm <sup>2</sup> /s	1.9 – 4.1 mm <sup>2</sup> /s
Contenido de azufre	0.0015% máximo	0.0003%

Fuente: Elaboración propia

## 13) Definición de los vehículos en el simulador

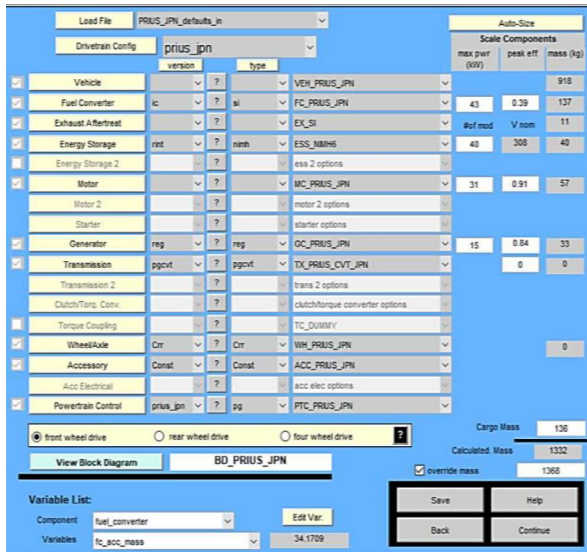
Para poder llevar a cabo la definición de los vehículos en el simulador se deben tomar en cuenta las dimensiones de los componentes de estos y teniendo los datos generales del vehículo, tales como: tipo de motor, potencia, dimensiones de las llantas, etc. Se ingresan a la interfaz gráfica del programa como se muestra en la figura 8 y en la figura 9:

**Fig. 8. Configuración de valores iniciales de simulación.**



Fuente: Advanced Vehicle Simulator (Departamento de energía de los Estados Unidos de América, 2013)

**Fig. 9. Configuración de valores iniciales de simulación.**



Fuente: Advanced Vehicle Simulator (Departamento de energía de los Estados Unidos de América, 2013)

Para poder definirlo se deben ingresar los datos del vehículo. Por ejemplo, si el vehículo en cuestión contiene un motor de combustión interna se debe especificar si éste es encendido por chispa (si) o si es encendido por compresión (ci). Por otro lado, si la transmisión es automática (auto) o bien, manual (man). Esto se hizo para ambos casos, en el modelo Prius de Toyota y en el modelo 7700 híbrido de Volvo con los valores característicos de cada uno.

#### 14) Introducción del ciclo de conducción

Ya definido el ciclo de conducción con los datos obtenidos, se procedió a hacer los cambios en los parámetros establecidos previamente. En este proceso se hicieron las modificaciones del ciclo de conducción incluido en la librería de Advisor®. Para esto se utilizó como base el ciclo predeterminado CYC\_1015 y se ingresaron los

datos del ciclo de conducción de la línea 1 del Metrobús nombrando dicho archivo como "CYC\_Linea1MetroCDMX", al tener el archivo, se crea el archivo de tipo .m, como se muestra en la figura 10 el cual será elegido posteriormente en la interfaz de Advisor®.

**Fig. 10. Ingreso del ciclo de conducción creado al simulador.**

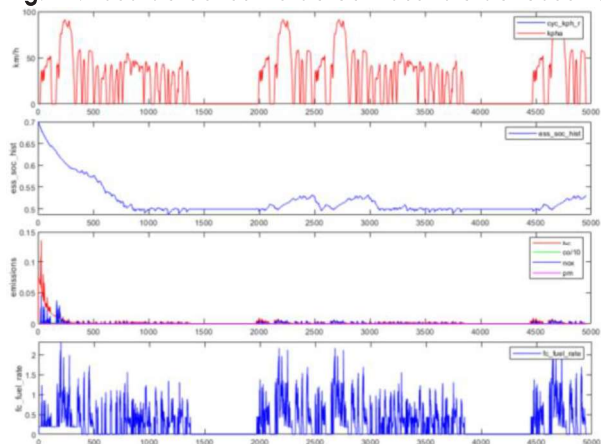
Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
CYC_HWFET	24/04/2013 02:50 ...	Microsoft Access ...	13 KB
CYC_HWFET_MTN.m	24/04/2013 02:50 ...	Archivo M	3 KB
CYC_IDLING.m	24/04/2013 02:50 ...	Archivo M	3 KB
CYC_IM240.m	24/04/2013 02:50 ...	Archivo M	3 KB
CYC_IM240	24/04/2013 02:50 ...	Microsoft Access ...	4 KB
cyc_india_hwy_sample.m	24/04/2013 02:50 ...	Archivo M	3 KB
CYC_INDIA_HWY_SAMPLE	24/04/2013 02:50 ...	Microsoft Access ...	14 KB
cyc_india_urban_sample.m	24/04/2013 02:50 ...	Archivo M	3 KB
CYC_INDIA_URBAN_SAMPLE	24/04/2013 02:50 ...	Microsoft Access ...	43 KB
CYC_INRETS.m	24/04/2013 02:50 ...	Archivo M	5 KB
CYC_INRETS	24/04/2013 02:50 ...	Microsoft Access ...	31 KB
CYC_INTERACTIVE.m	24/04/2013 02:50 ...	Archivo M	4 KB
CYC_L60MPH.m	24/04/2013 02:50 ...	Archivo M	3 KB
CYC_LA92.m	24/04/2013 02:50 ...	Archivo M	3 KB
CYC_LA92	24/04/2013 02:50 ...	Microsoft Access ...	23 KB
CYC_Linea1MetroCDMX.m	20/06/2019 12:55 ...	Archivo M	3 KB
CYC_Linea1MetroCDMX	20/06/2019 12:48 ...	Microsoft Access ...	41 KB
CYC_MANHATTAN.m	24/04/2013 02:50 ...	Archivo M	6 KB
CYC_MANHATTAN	24/04/2013 02:50 ...	Microsoft Access ...	18 KB
CYC_MEASURED_MASS1	24/04/2013 02:50 ...	Microsoft Access ...	1 KB
CYC_MXINBUS	10/12/2015 12:36 ...	Microsoft Access ...	4 KB
CYC_MXINBUS_MASS_VAR1.m	27/10/2015 09:25 a...	Archivo M	5 KB
CYC_MXINBUS_MASS1	28/10/2015 09:27 a...	Microsoft Access ...	4 KB
CYC_MXTHBUS	03/11/2015 11:09 a...	Microsoft Access ...	4 KB
CYC_MXTHBUS_MASS_VAR1.m	03/11/2015 11:37 a...	Archivo M	6 KB
CYC_MXTHBUS_MASS1	04/11/2015 08:04 a...	Microsoft Access ...	2 KB
CYC_MXTPBUS	28/10/2015 10:02 a...	Microsoft Access ...	4 KB
CYC_MXTPBUS_MASS_VAR1.m	28/10/2015 08:07 a...	Archivo M	5 KB

Fuente: Advanced Vehicle Simulator (Departamento de energía de los Estados Unidos de América, 2013)

Al tener los archivos creados, se colocan en la carpeta de Advisor® donde se encuentran los ciclos de conducción predeterminados para poder ser seleccionados desde la interfaz, esto se muestra en la figura 11:



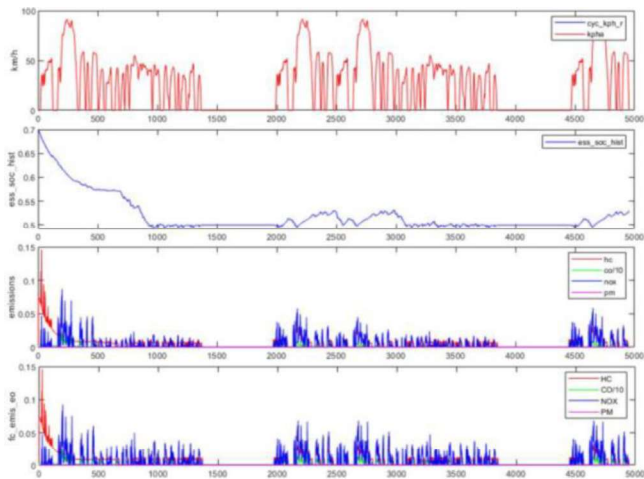
**Fig. 14. Tasa de consumo de combustible del caso 1.**



Fuente: Advanced Vehicle Simulator (Departamento de energía de los Estados Unidos de América, 2013)

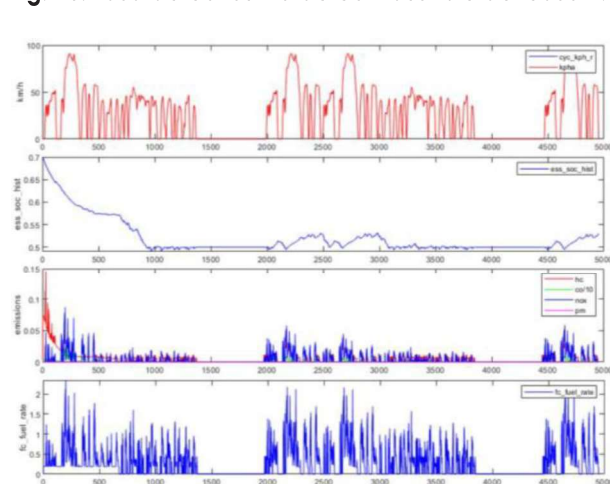
**16) Caso 2: Toyota Prius utilizando bioetanol**

**Fig. 15. Tasa de emisión de contaminantes del caso 2.**



Fuente: Advanced Vehicle Simulator (Departamento de energía de los Estados Unidos de América, 2013)

**Fig. 16. Tasa de consumo de combustible del caso 2.**



Fuente: Advanced Vehicle Simulator (Departamento de energía de los Estados Unidos de América, 2013)

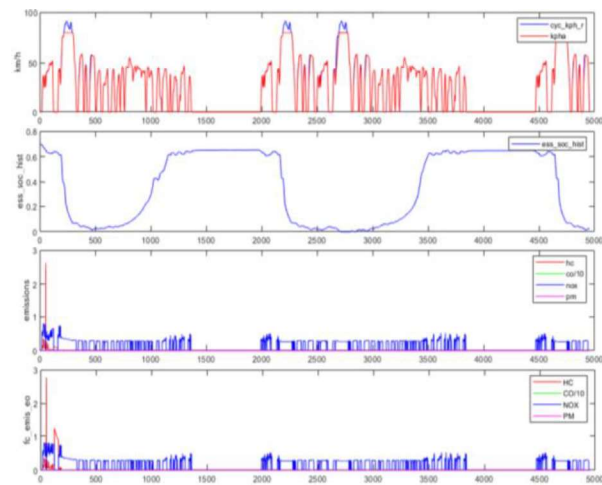
El en primer caso se utilizó gasolina como combustible para el modelo Prius de Toyota®, los resultados muestran que los consumos no fueron los mismos pero la diferencia entre ambos fue mínima, sin embargo, la emisión de contaminantes cambió considerablemente como se muestra en la figura 13 en el primer caso y en la figura 16 en el segundo, aumentando en casi cinco veces las emisiones de NOx, de un valor de 0.113 g/km en el caso de la gasolina a 0.593 g/km para el caso del bioetanol, lo que es normal para la naturaleza del biocombustible.

Por otra parte, la emisión de CO se pronosticaba ser menor para el caso del bioetanol, pero se observó un aumento en la emisión de este contaminante, pasando de 0.411 g/km por parte de la gasolina hasta 1.567 g/km por parte del biocombustible, lo que representa un incremento del 381%, este resultado es considerable tomando en cuenta las

consecuencias que tiene a la salud humana la exposición a este contaminante.

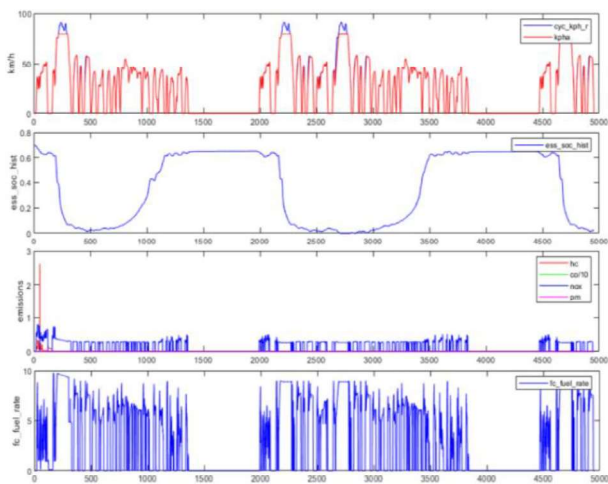
**17) Caso 3: Volvo 7700 híbrido utilizando diésel.**

**Fig. 17. Tasa de emisión de contaminantes del caso 3.**



Fuente: Advanced Vehicle Simulator (Departamento de energía de los Estados Unidos de América, 2013)

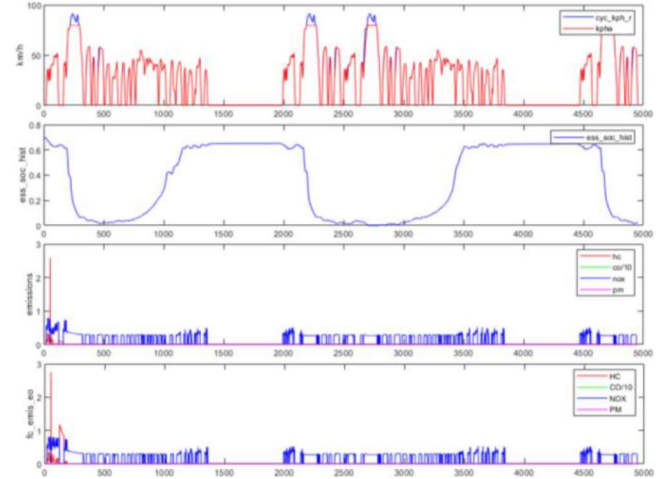
**Fig. 18. Tasa de consumo de combustible del caso 3.**



Fuente: Advanced Vehicle Simulator (Departamento de energía de los Estados Unidos de América, 2013)

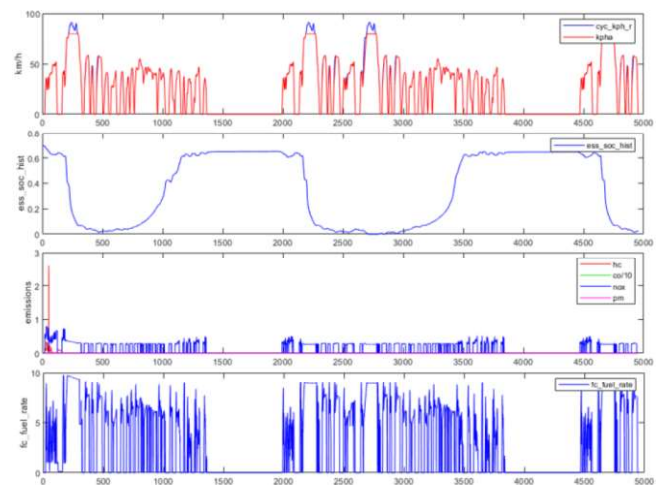
**18) Caso 4: Volvo 7700 híbrido utilizando biodiésel**

**Fig. 19. Tasa de emisión de contaminantes del caso 4.**



Fuente: Advanced Vehicle Simulator (Departamento de energía de los Estados Unidos de América, 2013)

**Fig. 20. Tasa de consumo de combustible del caso 4.**



Fuente: Advanced Vehicle Simulator (Departamento de energía de los Estados Unidos de América, 2013)

Las emisiones contaminantes fueron menores utilizando biodiésel puro, obteniendo una tasa



de emisión de NOx de 20.929 g/km, en el caso del diésel fósil se tuvo una tasa de 20.951 g/km, lo que se puede observar en la figura 17 y 19.

Para las emisiones de CO, en el primer caso (biodiésel), se obtuvo una tasa de 0.267 g/km, menor comparado con la del segundo caso (diésel fósil), la cual fue de 0.274 g/km, lo cual representó una disminución del 2.55%.

Las emisiones de HC utilizando biodiésel fueron de 0.466%, comparando esta tasa de emisión con la del diésel fósil que fue de 0.486%, se tuvo una disminución del 4.11%.

En el caso del consumo de combustible, mostrado en la figura 18 para el caso 3 (utilizando diésel) y en la figura 20 para el caso 4 (utilizando biodiésel), se puede observar una disminución del consumo del combustible del 1.56%.

## Conclusiones

Los resultados muestran tendencias notables en el uso de biocombustibles comparado con los combustibles convencionales. Las condiciones en las que se llevaron a cabo las simulaciones fueron las mismas (terreno, perfil altimétrico, ciclo de conducción y ruta).

En el primer caso se utilizó gasolina como combustible para el modelo Prius de Toyota®, los resultados muestran que los consumos no fueron los mismos pero la diferencia entre ambos fue mínima, sin embargo, la emisión de contaminantes cambió considerablemente, aumentando en casi cinco veces las emisiones de NOx, de un valor de 0.113 g/km en el caso de la gasolina a 0.593 g/km para el caso del

bioetanol, lo que es normal para la naturaleza del biocombustible.

En el caso de la emisión de hidrocarburos (combustible sin quemar y vapores de aceite) o HC, también se tuvo un incremento del 263% pasando de la emisión de 0.363 g/km por la gasolina hasta 0.955 g/km por el bioetanol.

Se observó que el desempeño del vehículo para ambos casos cumplió con las características del ciclo de conducción, es decir, no hubo un desfase entre la velocidad estipulada con la distancia requerida utilizando cualquiera de los dos combustibles.

En las temperaturas alcanzadas por parte de los componentes del vehículo tales como el bloque, los accesorios del motor, los cilindros y el cofre, fueron más altas para el caso del vehículo utilizando gasolina, disminuyendo casi 20°C en promedio utilizando bioetanol para todos los componentes.

El consumo de combustible tuvo una diferencia mínima comparando ambos casos, en el primero (gasolina) la tasa de consumo fue de 5.1 L/100 km y en el segundo (bioetanol) fue de 5.0 L/100 km.

En el caso del modelo 7700 híbrido de Volvo® se obtuvo una tasa de 51.2 L/100 km utilizando diésel fósil y una de 50.4 L/100 km para el caso del biodiésel.

Los comportamientos de carga de la batería para el accionamiento del motor eléctrico fueron muy parecidos en ambos casos.

En el caso del modelo 7700 híbrido de Volvo® se observa un desfase en el rendimiento del vehículo comparado con el ciclo de conducción, tomando en cuenta de que el vehículo que circula en la línea uno del Metrobús tiene características diferentes al modelo 7700 híbrido, se puede asociar ese comportamiento a esta situación, ya que en ambos casos se tuvo un comportamiento similar.

La variación de las temperaturas del motor y sus componentes no fue evidente, siendo prácticamente las mismas.

Los resultados en ambos casos tienen particularidades. En el caso del modelo Prius de Toyota®, los resultados esperados eran distintos a los obtenidos, con la revisión literaria e investigación de trabajos relacionados, se tienen tendencias que no se cumplen, tales como el consumo de combustible, el cual se pronosticaba como menor en el caso de la gasolina, así como la reducción de emisiones contaminantes a excepción de los NOx, por el contrario, se tuvieron incrementos en los contaminantes criterio que se tomaron en cuenta, obteniendo resultados no pronosticados.

En el caso del modelo 7700 híbrido, los resultados fueron los esperados, sin embargo, la tendencia a pesar de ser cumplida no fue evidente como se pronosticaba, teniendo disminución en la emisión de contaminantes y aumento en el consumo de combustible utilizando biodiésel.

Tomando en cuenta que el software utilizado (ADVISOR) es un modelo semi-empírico, éste utiliza mapas de búsqueda en lugar de simulaciones físicas puras de motores y similares. Estos mapas tienen la ventaja de ser muy rápidos, la desventaja es que, para caracterizar un modelo, se tienen que crear estos mapas a partir de experimentación física. La recomendación que se hace por parte de los desarrolladores del programa es hacer el cambio de las características del combustible, sin embargo, la eficiencia de los mapas no será la correcta. Por lo tanto, para poder desarrollar una simulación exacta de los vehículos bajo ciertas condiciones, tales como las del sistema Metrobús, se recomienda introducir un mapa creado a partir de experimentación en dichas condiciones para poder llevar a cabo la simulación de una manera precisa y tener valores confiables.

El presente trabajo busca ser un antecedente de dicha aplicación, para que en un modelo en específico se hagan los mapas correspondientes y las simulaciones posteriores sean valores que cumplan con las tendencias establecidas.

## Agradecimientos

El presente trabajo se deriva del proyecto IPN SIP 20190040 Diseño y construcción de un banco experimental para la evaluación ambiental de motores de combustión interna, IPN – México, SIP 20190040.

## Referencias

- [1] Checa Artasu, M. M. (2016). Las áreas verdes en la Ciudad de México. Las diversas escalas de una geografía urbana. Revista bibliográfica de geografía y ciencias sociales.
- [2] Micheli, J. (2000). Política ambiental en el sexenio 1994-2000. El cotidiano, 14.
- [3] Germá Bel, Maximilian Holst. (2018). Evaluation of the impact of bus rapid transit on air pollution in Mexico City. Revista: Transport Policy. Vol. 63 (209-220).
- [4] Ramos, D., Díaz, M., & Villar, M. (2016). Biocombustibles. Universidad Nacional del Sur - Conicet, 69-73.
- [5] Martínez, J. (2016). Autos Híbridos. Madrid: TAI 2.
- [6] Ehsani, M., Gao, Y., & Longo, S. E. (2018). Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Boca Ratón: CRC Press.
- [7] SourceForge. (15 de Marzo de 2019). SOURCEFORGE. Obtenido de <https://sourceforge.net/projects/adv-vehicle-sim/>
- [8] Toyota motors corporation. (2004). Toyota Prius Modelo de 2004 2a generación, guía de respuesta ante emergencias. Toyota motor coroporation.
- [9] Metrobús. (2019). Gobierno de la Ciudad de México. Obtenido de Metrobús: <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/dependencia/acerca-de>
- [10] Volvo buses. (2015). Autobuses híbridos, movilidad y ambiente ahora en paralelo. Tultitlán: Volvo.
- [11] Departamento de energía de los Estados Unidos de América. (24 de abril de 2013). Advanced Vehicle Simulator. Estados Unidos.